

繊維集合体の曲げ振動特性の解析

松 平 光 男・張 如 全*

Analysis of Bending Vibration of Fiber Assemblies

Mitsuo MATSUDAIRA and Ruquan ZHANG*

Abstract

Bending Vibratin of fabrics are investigated precisely and following conclusions were obtained : 1) The bending vibration of fabrics is damped linearly with tme in two steps, irrespective of the fiber material, fabric structure, until the amplitude becomes approximately 1/5 of the initial amplitude. 2) New regression equations are derived to calculate the amplitude decrease in the 1st step of bending vibration ($\Delta d1$) from hysteresis (2HB). 3) In the comparison between woven and knitted fabrics, $\Delta d1$ of knitted fabrics is larger and $\Delta d2$ (the amplitude decrease in the 2nd step) is similar. 4) In the comparison between filament and spun fabrics, $\Delta d1$ of spun fabrics is larger.

1. 緒言

布の曲げ特性はその風合いや変形挙動を支配する大きな要因になると考えられる。布の曲げ特性の測定法については非常に多くの報告¹⁾があり、現在標準的に用いられているKESシステム²⁾では、純曲げ試験による曲げモーメント対曲率の往復曲線の中央部をそれぞれ直線近似し、曲率 0.5cm^{-1} と 1.5cm^{-1} との間の傾斜、及び曲率 -0.5cm^{-1} と -1.5cm^{-1} との間の傾斜の平均値を曲げ剛性Bと定義し、曲率 $\pm 1.0\text{cm}^{-1}$ でのヒステレシス幅の平均値を曲げヒステレシス2HBと定義し、それらの特性値を用いて布の風合いを客観的に評価している³⁾。

衣服について考えた場合、布の動的特性が重要と考えられ、人に動的な美的感覚を与える要因としては、歩行や微風によって衣服が揺動し、振動する様子が最も大きいと考えられる。

布の曲げ振動特性についての解析では、小野木ら⁴⁾による振動リード法による布の曲げ剛性の測定、朱ら⁵⁾による布の非線形を考慮した1

自由度振動解析、鮑ら⁶⁾による非線形有限要素法によるはりの曲げ振動解析、等がある。しかしながらこれらの研究では、布の曲げ振動に関する理論的解析のみに注力しており、実際の衣服の揺動にまで応用することは困難と思われる。泉ら⁷⁾は婦人用薄手布の曲げ振動特性を調べているが、基礎現象や理論の解析の点、及び実際の衣服の美観との対応の点で未だ不十分と思われる。

本研究では、KES-LABO-MODEL-F2を用いて、繊維集合体の曲げ振動特性について検討し、振動特性の特徴を表すパラメータを見出す。かつ、見出した四つの曲げ振動パラメータの妥当性を検討するため、布の曲げ振動特性を測定して、得られたパラメータを変数にしたクラスター分析による布の分類を試みる。

2. 実験

2. 1 実験装置

布の曲げ振動特性は、KES-LABO-

MODEL-F2振動テスターによって求めた。装置の基本原理図をFig. 1に示す。試料は幅1 cm, 長さ3 cmとし, 布を曲げて2枚の平行板にはさんで右側の板を固定し, 左側の板が振り子と連動して振動する。初期振幅は1 mmとした。

布の純曲げ特性の測定にはKES-F2曲げ試験機を用い, 得られたデータはA/D変換モジュールを通して, コンピュータに入力し, 曲げモーメント対曲率のヒステリシスループから曲げ剛性Bと曲げモーメントのヒステリシス幅2HBを求めた。

測定環境は温度 295 ± 3 K, 相対湿度 60 ± 3 %である。

2. 2 試料

広範囲の布の曲げ振動特性について検討するため, 各種の繊維素材, 構造, 用途などの点を考慮し, 市販されている布(109点)を選択した。これらサンプルは織物サンプルとしてポリエステル24点, コットン, ウール, シルク各20点で

あり, 編物サンプルとしてはポリエステル12点, コットン7点, ウール6点である。サンプルの種類と主な特性範囲をTable 1に示す。絹織物については, 通常多用されている後練フィラメント織物のみ検討した。

3. 理論

実際の布は繊維あるいはその集合体である。布の曲げ振動特性は粘弾性的で, 完全弾性体鋼鉄の振動特性や塑性プラスチックなどの非線形振動特性とは本質的に異なるものである。振り子の振動は, 布の粘性抵抗及び繊維あるいはその集合体である糸の間に生じる摩擦抵抗を考慮して, Fig. 1の振動系をFig. 2のような振動モデルに等価変換して解析する⁸⁾。

振動方程式は以下となる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + Kx \pm D = 0 \quad (1)$$

但し, m : 振り子の質量

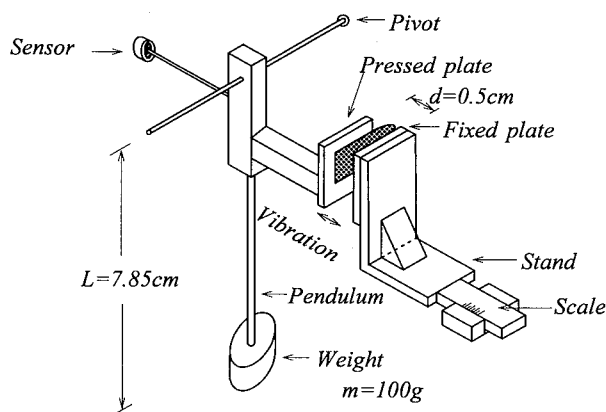


Fig. 1 Schematic model of bending vibration apparatus; KES-LABO-MODEL-F2.

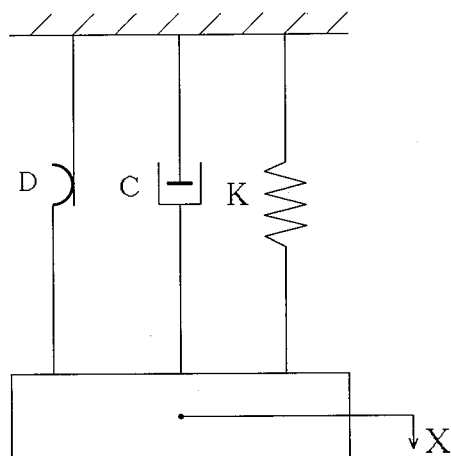


Fig. 2 Equivalent model of bending vibration of fabric.

c : 粘性抵抗係数；振り子自身の粘性抵抗係数と布の粘性抵抗係数を含む

K : バネ定数；振り子自身の弾性抵抗係数と布の曲げ弾性抵抗係数を含む

D : 摩擦効果項；繊維あるいは糸の間に生じる摩擦抵抗，xの増加過程($\frac{dx}{dt} > 0$)では正符号をとり，xの減少過程($\frac{dx}{dt} < 0$)では負符号をとる。

初期条件：t=0, x=x₀で(1)式を解くと，粘性係数が比較的小さな場合，即ち， $c^2 < 4mK$ の場合，減衰振動となり，(1)式の解は次式で表される。

$$x = \pm \frac{D}{K} + \left(x_0 \mp \frac{D}{K} \right) \sqrt{\frac{4mK}{4mK - c^2}} \exp\left(-\frac{ct}{2m}\right)$$

$$\cos\left(\sqrt{\frac{4mK - c^2}{4m^2}}t + \theta\right) \quad (2)$$

但し，

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{c}{\sqrt{4mK - c^2}}\right)$$

振動の周期T，及び振動数fは次式で表せる。

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{4mK - c^2}{4m^2}}}$$

$$f = \frac{\sqrt{\frac{4mK - c^2}{4m^2}}}{2\pi} \quad (3)$$

粘性効果を見捨てる場合，即ちc=0の場合，(2)式は以下の式で表せる。

$$x = \pm \frac{D}{K} + \left(x_0 \mp \frac{D}{K} \right) \cos\sqrt{\frac{K}{m}}t \quad (4)$$

はじめの半サイクルの解は

Table. 1 Details of Fabric Samples

Sample No	Material	Structure	Yarn(warp/weft) Counts(tex)	Mass (g/m ²)	Thickness (mm)
1-20	Polyester	Weave	5.6-23.3/8.7-23.3	70-210	0.192-0.743
85-96	Filament	Knit	8.3-23.3/8.8-23.3	98-223	0.203-0.898
21-24	Polyester Spun	Weave	12.5-19.7/12.5-19.7	123-158	0.421-0.526
25-44	Cotton	Weave	9.1-31/9.1-31	112-420	0.235-2.252
97-103		Knit	9.1-31/9.1-31	123-398	0.423-2.583
45-64	Wool	Weave	12.4-33.3/12.4-33.3	156-540	0.388-2.852
104-109		Knit	14.5-23.3/14.5-23.3	176-488	0.523-2.983
65-84	Silk Filament	Weave	2.1-9.3/2.3-9.3	42-240	0.184-0.857

$$x = \frac{D}{K} + \left(x_0 - \frac{D}{K}\right) \cos \sqrt{\frac{K}{m}} t \quad (5)$$

となり、次の戻りの半サイクルの解は

$$x = -\frac{D}{K} + \left(x_1 + \frac{D}{K}\right) \cos \sqrt{\frac{K}{m}} t \quad (6)$$

となる。但し、 x_1 は半サイクル後の最大振幅値である。

ここで、 $t = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{K}{m}}}$ の時を考えると、

$$x_1 = \frac{D}{K} - \left(x_0 - \frac{D}{K}\right)$$

となり、半サイクル後の振幅減少量は $2D/K$ となる。それ故、1サイクルごとに減衰振動の振幅減少量は、

$$\Delta x = 4D/K \quad (7)$$

である。この場合、減衰曲線は直線となる。実験条件が一定の場合、振幅減少量は摩擦効果項

D によって決まる。摩擦効果項 D が減衰振動の過程で変化する場合、減衰振動の振幅減少量も変化し、減衰曲線は多段階直線となる。

布の曲げ振動減衰挙動の代表例をFig. 3に示す。減衰曲線は指数関数的ではなく、二段階の直線的に減衰している。この減衰特性は繊維素材の相違により、振動持続時間と振幅減少量が異なることがわかった。ここで、振動の停止領域は振り子の効果のみになると考えられるので、振幅が初期の1/5に至るまでの減衰曲線を検討の対象とする。その結果、この間の振動曲線は大部分の試料で二つの直線で近似できることがわかった。このことは振り子系の粘性効果項が無視できることを意味している。また、曲げ振動における摩擦効果が二段階に変化していることを意味している。この時の減衰直線は(7)式で表されるため、二つの D 値を有していることがわかる。このような減衰挙動は繊維集合体である布の特徴で、糸間及び繊維間の摩擦に基づくものと考えられる。

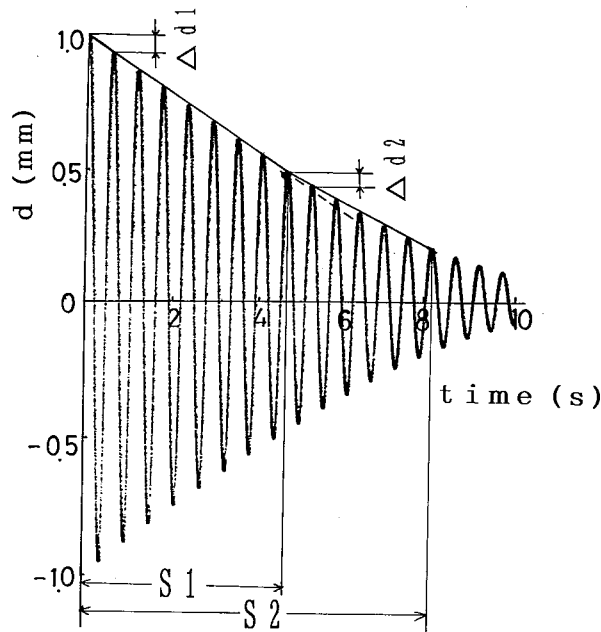


Fig. 3 Atypical example of damping behavior of fabric bending vibration.

本実験試料の中には、振動が1 min以上も持続し続けるものもあり、その場合、減衰振動曲線が三直線以上の多直線で近似することができた。しかしながら、本研究では、三直線以上については例外として、検討外とした。

布の曲げ振動特性を特性値で表すため、Fig. 3に示す4個のパラメータを取り上げる⁹⁾。即ち、 $\Delta d1$ は第一段階の振幅減衰量であり、 $\Delta d2$ は第二段階の振幅減衰量である。S1は第一段階の振動持続時間であり、S2は振幅が初期振幅値の1/5に至るまでの振動持続時間である。

4. 結果及び考察

4.1 振幅減少量と曲げ特性値2HBとの関係⁹⁾

布の曲げ振動曲線の振幅減少量 Δd と2HBとの関係については、既に川端が次の理論式を提出している¹⁰⁾。

$$\Delta d1 = 3.55 \frac{2HB}{d} \cdot \frac{L}{m} \quad (8)$$

但し、 d ：静止時の平行板間隔 (cm)

L ：振り子の長さ (cm)

本式を用いた場合、2HBが小さな値の範囲では実験値と理論値とが一致することが泉ら⁷⁾により確認されている。しかしながら、2HBが大きい場合には両者の差が大きく、また、繊維の種類によって摩擦項が異なるため、本式では不十分であると考えられる。

本実験条件では、重錘の質量 m が布の曲げ弾性抵抗係数に比べてはるかに大きいため、(7)式の K は振り子自身の弾性抵抗係数にほぼ等しくなる。従って、(7)式は以下の式に変換出来る。

$$\Delta d1 = \frac{4D}{g} \cdot \frac{L}{m} \quad (9)$$

但し、 g ：重力の加速度=980cm/s²

繊維集合体の曲げ変形時の内部摩擦は変形一回復サイクルにおけるエネルギー消費の原因となるので、摩擦項 D はヒステレシス2HBに比例していると考えることが出来る。また、平行板

間隔 d は布の曲げ振動時の曲率半径を決定しており、糸-糸間の接触状況に直接的に影響を及ぼしており、 d が大きいほど糸-糸間の摩擦が小さく、 d が小さいほど摩擦が大きくなると考えられるため、摩擦効果項は d に反比例していると仮定できる。そこで、振動減衰の第一段階の減少量に対して以下の式を考える。

$$\Delta d1 = \alpha + \beta \frac{2HB}{d} \cdot \frac{L}{m} \quad (10)$$

但し、 α ：補正項、

β ：振幅減衰係数と定義する。

ここで β は繊維素材に依存すると考え、本実験条件で求めた試料全てに対して回帰式を誘導し、四種の素材別にまとめたところ、Table 2に示す結果が得られた。これらの回帰式を用いれば、KESシステムで得られる純曲げ特性のヒステレシス2HBから布内の内部摩擦効果が予想でき、布の曲げ振動特性の振幅減少量が推定出来ることを意味している。

4.2 曲げ振動パラメータと布の構造(ニット、織物)との関係¹¹⁾

今回実験したサンプルをニットと織物に分類し、振動減衰特性の特徴を表す四つのパラメータと純曲げ特性の特性値 B 、2HBとの関係をFig. 4, 5に示す。これらの図からわかるように、布の構造の違いによって、即ちニットと織物とで曲げ振動特性の違いが明確に表れている。ニットは織物に比べて B が小さいにもかかわらず、 $\Delta d1$ は大きいことがわかる。また、2HBが同程度の値の布でも、ニットの $\Delta d1$ は大きく、S1, S2は小さく、振動は早く止まるものが多い。ニットの構造を考えると、糸と糸との間の接触は直交ではない場合が多く、糸と糸との間の摩擦が大きくなると考えられる。従って、同じ2HBの布でも、ニットの $\Delta d1$ は大きくなる。また、一般にニットのヒステレシス2HBも大きい布が多いので、(10)式より、 $\Delta d1$ は大きくなると考えられる。従って、ニットの場合、実測値の B は

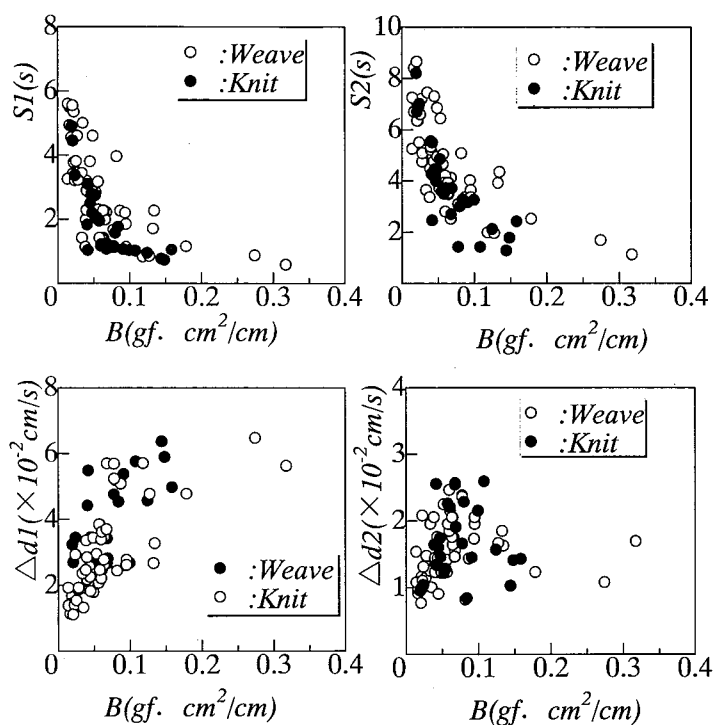


Fig. 4 Relationship between the four bending parameters and B for woven and knitted fabrics.

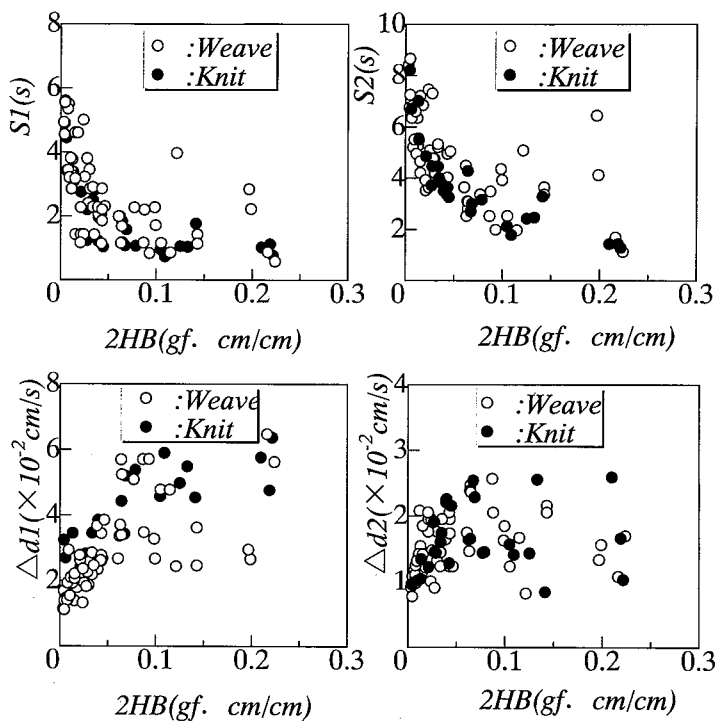


Fig. 5 Relationship between the four bending parameters and 2HB for woven and knitted fabrics.

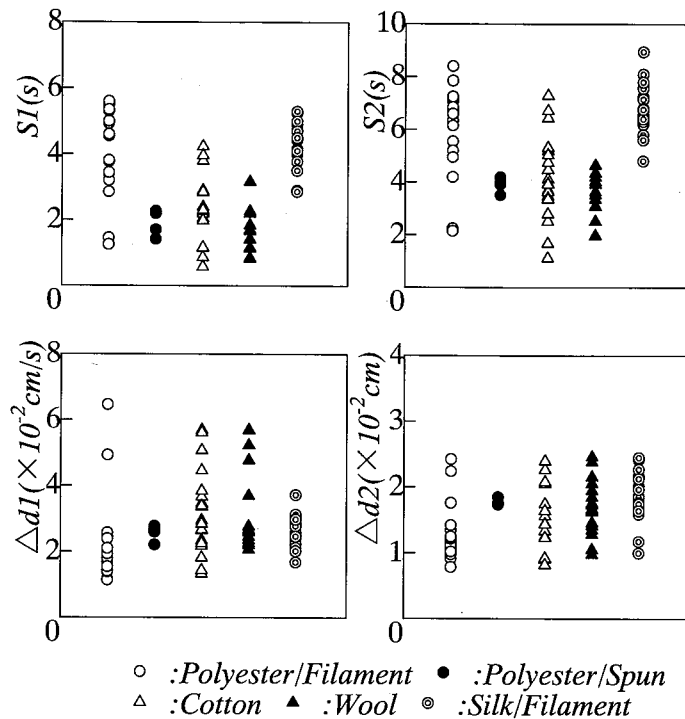


Fig. 6 Results of the four bending parameters for filament and spun fabrics.

小さいにもかかわらず、 $\Delta d1$ は大きいと考えられる。

$\Delta d2$ の分布範囲を見ると、 $\Delta d2$ はニットと織物との顕著な差がないことがわかる。これは $\Delta d2$ が糸の内部摩擦に関連するからであると考えられる。 $S1$, $S2$ については、ニットの $\Delta d1$ は大きいので、 $S1$, $S2$ も小さくとなると考えられる。即ち、ニットの曲げ振動は織物より早く停止する。

4. 3 曲げ振動パラメータと糸の構造（スパン、フィラメント）との関係¹¹⁾

今回実験したサンプルの曲げ振動パラメータの値をFig. 6に示す。一般的にフィラメント布よりスパン布の $\Delta d1$ は大きく、 $S1$ は小さいことが明らかに示されている。スパン布はスパン糸からできているため、糸と糸との間の摩擦がフィラメント糸に比べて大きいと考えられる。それ故、 $\Delta d1$ あるいは $S1$ の値はスパン布とフィラメント布とを判別するパラメータの一つにな

ると考えられる。

一方、 $\Delta d2$ の分布範囲はFig. 6に示すように、スパン布とフィラメント布とは顕著な差がないことがわかる。 $\Delta d2$ は糸の構造に関連すると考えられるため、ポリエステルやシルク繊維の摩擦係数がウール、コットン繊維より大きいにもかかわらず^{11,12)}、ウール、コットン布はスパン糸より構成されているので、繊維と繊維との間の摩擦が大きく、最終的にこれらサンプル間の $\Delta d2$ に顕著な差が認められなくなっていると考えられる。それ故、 $\Delta d2$ では布の構造を判断することは難しい。 $\Delta d2$ は糸の構造、繊維-繊維間摩擦、あるいは繊維素材に関する一つのパラメータであると考えられる。

フィラメント布とスパン布とを比べると、フィラメント布の $S2$ の方が大きいことがわかる。即ち、スパン布の振動はフィラメント布より早く停止することを意味している。スパン布の $\Delta d1$ は大きいので、 $S2$ は小さくなるのである。 $S2$ は布の振動持続時間を表すため、布の構

Table. 2 Regressed Equations of Bending Vibration

Material	Regressed equation	Damping ratio β	Correlation coefficient
Polyester	$\Delta d1=0.00147+0.1974*2HB$	1.257	0.94
Cotton	$\Delta d1=0.00102+0.1454*2HB$	0.926	0.88
Wool	$\Delta d1=0.00132+0.1631*2HB$	1.034	0.86
Silk	$\Delta d1=0.00141+0.1820*2HB$	1.159	0.84


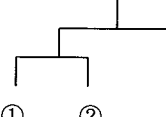
Parameter	Cluster
(1) $\Delta d1, S2, B$ 	① (1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20) p, (65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 84) s ② (21, 22, 23, 24) p, (25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44) c, (3, 13) p, (81) s, (45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64) w
(2) $\Delta d2, S1, 2HB$ 	① (1, 2, 5, 6, 8, 9, 20, 22, 23, 24) p, (25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44) c, (66, 70) s ② (21) p, (45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64) w, (78, 79) s ③ (3, 4, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19) p, (65, 67, 68, 69, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 80, 81, 82, 83, 84) s

Fig. 7 Results of cluster analysis.

造に関連すると思われる。S2も布の構造や繊維素材に関する一つのパラメータであると考えられる。

5. クラスタ分析

布の曲げ振動減衰曲線から見出した四つの曲げ振動パラメータ ($\Delta d1$, $\Delta d2$, $S1$, $S2$) は布の内部摩擦に関連するので、布の純曲げ特性値 (B , $2HB$) より布の特徴を反映していると考えられる。これらの値の曲げ振動パラメータとしての正当性を検討するため、曲げ振動実験で実

際の布の分類を試みた。上記で検討したように、曲げ振動パラメータは布の構造、素材に関連するため、曲げ振動の四つのパラメータと従来使っている純曲げ特性値 B , $2HB$ を組み合わせ、クラスタ分析を用いて、スパンとフィラメントの糸構造別の分類及びポリエステル、シルク、コットン、ウールの繊維素材別の分類を行う。物理的意味を明確するため、クラスタ分析に使用するパラメータの数は3個とした。分類の結果はFig. 5に示す。糸構造別に分類をするときには、パラメータ $\Delta d1$, $S2$, B を変数として選

んだときに最も良く二群を分類することができた。Fig. 7の(1)のような樹形図で二つのクラスに分けられる。第一クラスターはフィラメント布類である。第2クラスターはスパン布類である。例外としての三サンプル(No.3, No.13, No.81)を除くと、極めて良く二群に分けられている¹¹⁾。

繊維素材別に分類をするときには、パラメータ $\Delta d2$, $S1$, $2HB$ を変数としたときに最も良く分類できた。Fig. 7の(2)のような樹形図で、三つのクラスターに分けられる。第一クラスターはコットンとポリエステル布類である。第二クラスターはウール布類である。第三クラスターはシルクとポリエステル布類である。ポリエステル素材は主に天然繊維の力学特性や風合いをまねて作られているため、曲げ振動特性パラメータの分布は幅広く。今後さらに詳細な検討が必要である。

6. 結論

布の曲げ振動特性について、既報で提案した第一段階振幅減少量 $\Delta d1$ の理論誘導式を検討し、各種素材サンプルの曲げ振動特性を調べた結果、以下の結論を得た。

- (1) 布の振動減衰挙動は布の粘弾性抵抗係数が無視でき、繊維素材、糸や布の構造に拘わらず、減衰が初期振幅の1/5に至るまでは減衰曲線は二段階の直線になることを示した。
- (2) 布の初期曲げ振動減衰量と布のヒステシス $2HB$ との間に、繊維素材別に新しい回帰式を誘導できた。
- (3) ニットと織物とを比べると、ニットは B が小さいにもかかわらず、 $\Delta d1$ は大きく、 $S1$, $S2$ は小さくなる。 $\Delta d2$ の分布範囲を見ると、両者間に顕著な差はない。

- (4) スパン布とフィラメント布とを比べると、一般的にフィラメント布よりスパン布の $\Delta d1$ は大きく、 $S1$ は小さく、 $S2$ も小さくなる。スパン布の振動はフィラメント布より早く停止する。 $\Delta d2$ の分布範囲はスパン布とフィラメント布との間では顕著な差がない。
- (5) クラスター分析を用いて布類を良く分類できた。糸構造別に分類をするときには、パラメータ $\Delta d1$, $S2$, B を変数として選んだときに最も適切である。繊維素材別に分類をするときには、パラメータ $\Delta d2$, $S1$, $2HB$ の変数が最も適切である。

文献

- 1) 日本繊維機械学会, 布の風合い編集委員会編: “布の風合い—基礎と実際—”, 日本繊維機械学会, p. 171 (1972)
- 2) 川端季雄: 繊維機械学会誌 (繊維工学), 26, P721 (1973)
- 3) 川端季雄: “風合い評価の標準化と解析, 第2版”, 日本繊維機械学会, 風合い計量と規格化研究委員会, (1980)
- 4) 小野木, 安藤, 杉中: 繊維学会誌, 10, 32 (1954)
- 5) 朱, 石川, 他: 繊維機械学会誌 (論文集), 40, T81 (1987)
- 6) 鮑, 高寺, 篠原: 繊維学会誌, 49, 383 (1993)
- 7) 泉, 丹羽: 家政学雑誌, 32, 309 (1981)
- 8) 斉藤秀雄: “工業基礎振動学”, 養賢堂, p.35 (1989)
- 9) 松平光男, 張如全: 繊維機械学会誌, 49, T324 (1996)
- 10) 川端季雄: “やさしい布の力学と風合い”, 日本繊維機械学会講習会テキスト, 16 (1978)
- 11) 張如全, 松平光男: 繊維機械学会誌, 51, T47 (1998)
- 12) 日本繊維機械学会繊維工學刊行委員会編: 繊維工學 (II), p.306, 日本繊維機械学会 (1983)
- 13) 朱紅等編: 紡織材料学, p.246, 中国紡織工業出版社 (1987)